文章编号：1000-5773(2004)02-0103-06

FAE 装置参数对燃料抛撒与爆炸威力影响的实验研究*

惠君明，张 陶，郭学永

（南京理工大学化工学院，江苏南京 210094）

摘要：采用高速运动分析系统对 FAE 实验装置爆炸抛撒过程进行观测，描述了燃料抛撒过程的不同阶段，实验研究了比药量、长径比、壳体材质等装置参数对燃料抛撒与爆炸威力的影响。结果表明，燃料抛撒过程可分为射流形成与扩散运动阶段、燃料两向膨胀运动阶段和气液融合运动阶段。不同阶段对应不同的流体动力学特征，对云团形成的贡献不同。在实验装置总体优化条件下，适当增大比药量可提高云团覆盖面积与体积；在实验范围内长径比不是影响云团状态的显著因素，但长径比较大时可使燃料抛撒均匀性更好；采用钢质壳体时云雾抛撒状态明显优于铝质壳体。实验证明，采用碳钢壳体、比药量 3%左右、长径比为 3～5 且装置参数良好匹配时，可获得理想的云团状态和高威力爆炸波毁伤效应。

关键词：FAE；装置参数；爆炸抛撒；长径比

中图分类号：TQ560 **文献标识码**：A

1 引 言

燃料抛撒是燃料到燃料空气炸药(FAE)的转化与制造过程。由于该过程不是在工厂而是在 FAE 武器使用现场瞬时完成，因此要求有较高的技术组合和部件匹配，这就大大增加了抛撒(成雾)技术的难度和复杂性。分析燃料抛撒过程的动力学特征和合理选择装置参数，对于提高爆炸波能量输出，进而达到高威力毁伤效应具有重要意义。目前，有关装置参数对燃料抛撒与云团形成的规律研究，文献[1]曾进行过描述，但不够完善。本研究基于高速运动分析系统对燃料抛撒的观测结果，对燃料抛撒过程进行了较为细微的物理描述，分别实验研究了比药量、长径比及壳体材质等装置参数对燃料抛撒与爆炸威力的影响。典型的 FAE 模拟战斗部装置如图 1 所示。

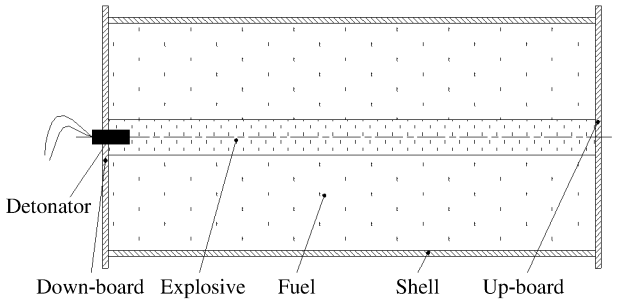


图 1 FAE 装置示意图

Fig. 1 Simulated device of FAE

2 燃料抛撒过程描述

燃料爆炸抛撒过程涉及到抛撒装药爆轰、冲击波、爆轰气体产物与介质相互作用，液体燃料的碎解

* **收稿日期**：2003-07-07；**修回日期**：2003-09-30

基金项目："十·五"国防重点预研项目基金(40404050201)

作者简介：惠君明(1946—)，男，研究员，博士生导师，主要研究方向为爆炸理论及应用、混合炸药.

等诸多力学和物理现象，是一个十分复杂的气液两相流体动力学问题。随着 FAE 应用研究的不断深入，国内外同行对燃料抛撒过程提出了各自不同的力学模型[2~5]，总体认为：燃料抛撒过程作用时间短，空间跨度大，应根据不同的力学特征，划分不同的阶段，采用不同的力学模型加以描述。我们在已有实验工作的基础上，分析认为燃料抛撒过程可划分为以下三个阶段。

2.1 射流形成与扩散运动阶段

中心抛撒炸药爆炸以后，中心装药管在棒状炸药滑移爆轰过程中，受到侧向动压使其爆裂破碎，液体燃料随即受到中心装药管形成的爆轰波和爆炸气体产物膨胀做功迅速向外运动。在壳体预制凹槽处，由于应力集中，强度削弱，首先形成裂缝。燃料从裂缝中喷出，形成射流，速度由零开始不断增大。这一阶段燃料抛撒运动主要发生在径向，扩撒初速大，受爆炸驱动力为主。随着射流在大气中不断加速扩散，中心装药管爆炸的气体和液体燃料的界面产生速度不连续的间断面，受其干扰射流失去稳定并产生涡旋。在涡旋的卷吸作用下，沿各个作用方向发展的射流逐渐融合，速度降低，不断被紧随其后的燃料云团主体吞并，直至射流尖峰消失。

2.2 燃料两向膨胀运动阶段

随着燃料抛撒距离的增加，中心装药的爆炸推力作用不断削弱，爆炸产物气体逐渐与燃料分离。这一阶段，燃料受惯性与气动阻力联合作用，在水平与垂直方向急剧膨胀。随着抛撒过程的不断深入，大气与液体燃料的界面的不稳定性得到进一步发展，液体破碎成液滴群，并伴随着大量汽化，初步形成较大面积的燃料云团。

2.3 气液融合运动阶段

燃料抛撒经过前面两个阶段以后，大面积云团基本形成。由于空气扰动加剧，这一阶段，不仅液体与气体之间存在质量、动量和能量交换，而且存在复杂的相互作用（如液滴破裂、蒸发和碰撞聚合等）。在以上气液两相不断融合扩散过程中，燃料液滴进一步碎解、雾化，最终形成大体积可爆轰云团。

3 装置参数对燃料抛撒与爆炸威力影响的实验研究

燃料抛撒（成雾）技术是形成理想云团状态的关键，它涉及到抛撒动力、弹体结构、燃料物化性质、气象条件等诸多因素。本研究在实验装置优化前提下，重点研究了比药量、长径比和壳体材质三种装置参数对燃料抛撒过程的影响。

3.1 比药量对燃料抛撒与爆炸威力的影响

比药量是指抛撒装药质量与液体燃料质量之比，它是表征爆炸抛撒强度的物理量，是 FAE 实验装置的一个重要结构参数。文献[6]曾讨论过比药量对燃料的抛撒作用。本研究通过 15 kg 装药量级、不同比药量装置的对比实验，分别给出了各自的装置参数、威力参数（见表 1）和不同时刻云雾外形尺寸变化曲线（见图 2）。

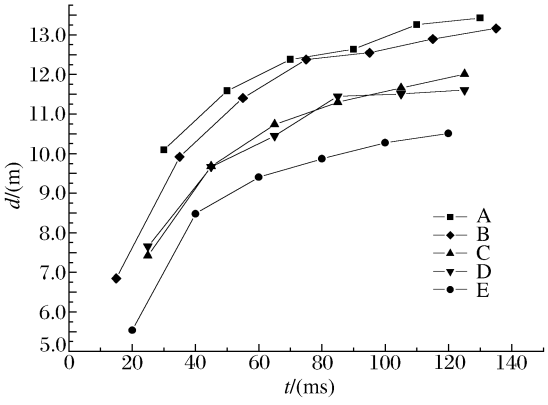


图 2 云雾直径与时间的关系

Fig. 2 The relation of cloud diameter and time

在实验范围内，随比药量的增加云雾抛撒初速明显增大，但在 4%～5.3%时增幅减小。从爆炸场参数看，比药量增到 2.78%后，冲击波作用区的 TNT 当量均可高于 6，云雾区爆炸超压处于较高值。在具体实验过程中，中心药量较大，一方面使装药工艺复杂化，另一方面由于密封缺陷，容易引起窜火，导致云团不能正常爆轰。实验结果表明，15 kg 量级实验装置，其比药量在 1.79%～5.30%范围内时，只要延迟时间、起爆位置等条件与之构成良好的匹配，所形成的云团均能实现良好的爆轰和较高的爆炸波威力输出，综合其它因素考虑，在现有装置结构条件下，比药量取 3%左右最佳。

表 1　15 kg 量级不同比药量的装置参数和威力参数

Table 1　Device and power parameters of the different specific central explosive of 15 kg FAE

Type	Size of central tube $d\times\delta$/(mm×mm)	Central explosive /(g)	Specific central explosive /(%)	TNT equivalence in shockwave area
A	50×1.5	800	5.3	6.1
B	43×1.5	590	4.0	6.3
C	37×1.4	420	2.8	6.4
D	30×1.3	270	1.8	5.7
E	25×1.25	190	1.3	4.0

3.2　长径比对燃料抛撒的影响

长径比是指战斗部壳体长度与直径之比,它是发展“低阻型”弹药的一个重要参数。关于长径比对燃料抛撒的影响,本文在前面对比药量优化选择的基础上,依据 15 kg 装药量级、比药量在 3.0%～3.2%范围、不同长径比装置的对比实验,分别给出了各自的装置参数、威力参数(见表 2)和不同时刻云雾直径、云雾高度、云雾体积变化曲线(见图 3、图 4、图 5)。

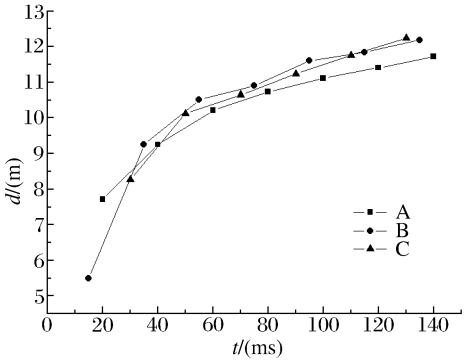


图 3　云雾直径与时间的关系

Fig. 3　The relation of cloud diameter and time

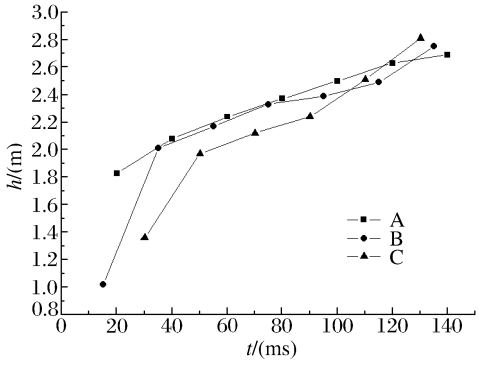


图 4　云雾高度与时间的关系

Fig. 4　The relation of cloud height and time

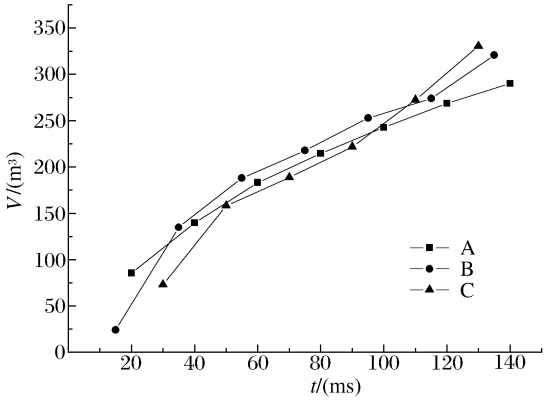


图 5　云雾体积与时间的关系

Fig. 5　The relation of cloud volume and time

实验结果表明:相同量级、不同长径比装置形成的最终云团外形尺寸参数差别不大,在实验范围内,均可获得较大体积的可爆轰云团。从爆炸威力效果看,随着长径比的增加,云雾区平均超压略有下降,但冲击波区 TNT 当量呈增长趋势,这对于毁伤大面积“软目标”是有利的。此外,通过高速运动分析系统的结果也发现,大长径比装置形成云团形状更理想,燃料浓度分布更均匀。为了进一步研究长径比与云团参数的变化关系,我们加做了 50 kg 量级、长径比在 1.7 和 5.0 两种装置的静爆实验,也获得了相同的实验结论。基于上述实验结果,理论分析如下:长径比增大,壳体单位长度承受的爆炸压力减小,解体时间延长,射流形成较晚,造成抛撒初始阶段,云团体积相对较小,随着时间的增长,大长径比装置云雾抛撒逐渐增强,至燃料抛撒过程结束,最终云团体积与小长径比装置相比,大致相等。另一方面,由于大长径比装置的轴向约束力增大,从而更有利于燃料的径向抛撒,形成扁圆柱形云团。综合分析认为,在实验范围内(1.35～5.0)长径比不是影响云团最终形态的显著性因素。

表 2 15 kg 量级不同长径比的装置参数和威力参数

Table 2 Device and power parameters of the different ratio of height to diameter of 15 kg FAE

Type	The ratio of height to diameter l/d	Devices parameters $L\times D$/(mm×mm)	Specific explosive /(%)	Average overpressure in cloud area /(MPa)	TNT equivalence in shockwave area	Cloud size at detonation $d\times h$/(m×m)
A	1.35	381×283	3.2	3.53	5.91	12.41×2.88
B	2.14	518×242	3.1	3.34	6.18	12.43×2.74
C	3.03	652×215	3.0	3.28	6.35	12.55×2.68

3.3 壳体材质对燃料抛撒的影响

FAE 实验装置一般采用薄壁圆柱结构，作用时为直立状态。为保证燃料在圆周方向均匀抛撒，形成轴对称均匀的燃料空气混合物，要求壳体侧壁强度显著小于上、下端板。目前，主要采用壳体外壁刻槽与合理布置抛撒装药结构等方式，实现壳体的均匀解体。

FAE 装置材料一般选用以下两种方案：

(1) 钢质材料：采用优质碳素结构钢，具有强度可靠、成本低廉、焊接工艺性好等优点，但壳体重量稍大，降低了有效载荷比重。

(2) 铝质材料：采用铝合金制造，如防锈铝、锻铝等。壳体重量轻，有利于提高装药量，但焊接工艺要求较高，质量和强度可控性差，成本较高。

为了分析不同材质壳体对燃料抛撒与爆炸威力的影响，分别给出了两种实验装置(钢质、铝质)5 kg 量级云团半径随时间的变化曲线(见图 6)、50 kg 量级装置爆炸威力参数及临爆前云团外形参数(见表 3)、壳体破片照片(见图 7、图 8)和临爆前的云雾照片(见图 9、图 10)。

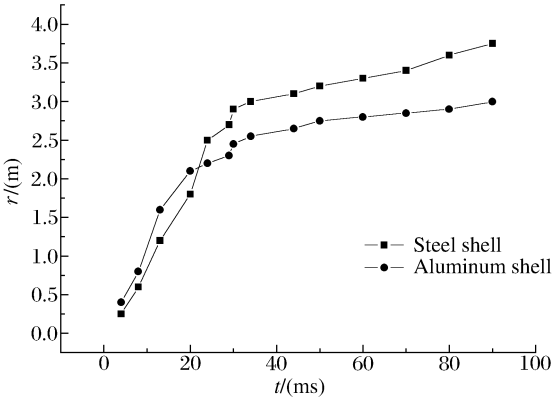


图 6 云团半径与时间的关系

Fig. 6 The relation of cloud radius and time

表 3 50 kg 量级装置威力参数和云团外形参数

Table 3 Power and dimension of cloud parameters of the 50 kg FAE

Material of shell	Cloud volume at detonation /(m^3)	The ratio of cloud height to diameter	Average overpressure in cloud area /(MPa)	TNT equivalence in shockwave area
Steel	1133	0.23	2.39	6.5
Al	883	0.22	2.37	5.4



图 7 钢质壳体破片照片

Fig. 7 The photo of the ruptured steel shell



图 8 铝质壳体破片照片

Fig. 8 The photo of the ruptured aluminum shell

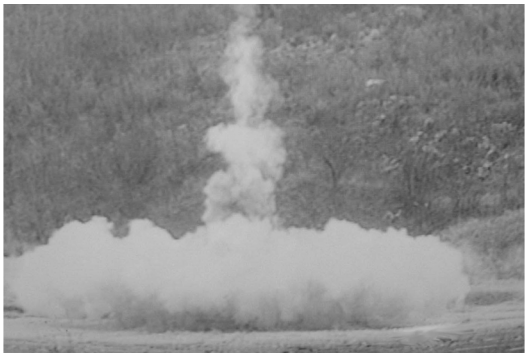


图 9　钢壳体云雾照片

Fig. 9　The cloud photo of the steel shell

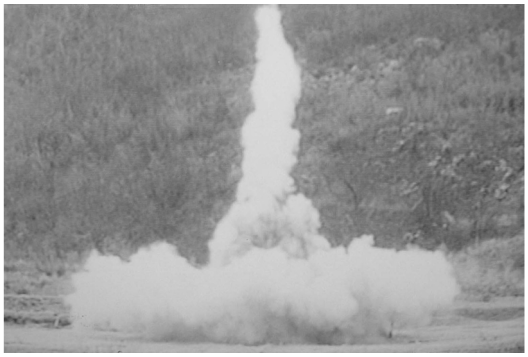


图 10　铝壳体云雾照片

Fig. 10　The cloud photo of the aluminum shell

由实验分析可知,在燃料抛撒初期,铝质壳体形成的云团半径稍大于钢质壳体,但随着时间的增加,钢质壳体云团半径增长速度显著大于铝质壳体,直至抛撒过程结束。从两种壳体形成的最终云雾状态看,钢质壳体的云雾覆盖面积和燃料浓度、粒度分布的均匀性等云雾质量参数均优于铝质壳体。另外,根据从爆炸现场回收的壳体碎片观察,钢质壳体破碎均为单片状;而铝质壳体尚有部分两片相连,破碎不均匀,这也证明了钢壳体云雾抛撒比较均匀,铝壳体云雾抛撒性较差。研究认为:壳体材质对燃料抛撒与爆炸威力的影响主要反映在材质本身力学性能和焊接工艺及装置总体强度上[7]。表 4 分别列出了钢质和铝质两种壳体材质的力学性能。

表 4　钢质和铝质两种壳体材料的力学性能

Table 4　Mechanical performance of steel shell and aluminum shell

Material	Limit of intensity σ_b/(MPa)	Limit of endure σ_s/(MPa)	Extension ratio /(%)
Little carbon steel	410	245	25
Alloyed aluminum	320	160	15

由表 4 可知,钢材质强度较高,塑性较好。在壳体装置加工中,钢壳体焊接质量与强度可控性较好,装置总体强度较高,分布较均匀。水压实验表明,本实验钢质壳体在 1.6 MPa 压力下壳体表面有微裂纹,在 2.2 MPa 压力下壳体圆周方向均匀破裂,有利于抛撒形成大面积理想形态的云团;铝质壳体在 0.7 MPa 压力下由于局部强度削弱,壳体在某一方向首先破裂,导致燃料抛撒不均匀,覆盖面积较小。综合分析认为,钢质壳体云雾抛撒性较好,形成的云团形态优于铝质壳体,适宜作为 FAE 实验装置的壳体材料。

4　结　论

通过高速运动分析系统对 FAE 实验装置爆炸抛撒过程进行观测,描述了燃料抛撒过程的不同阶段,分析了装置参数对燃料抛撒与爆炸威力的影响,主要结论如下:

(1) 在实验范围内,增大比药量可提高云团笼罩面积与覆盖体积。从装置的实验效果综合分析认为,比药量取 3%左右最优。

(2) 长径比(1.35～5.00)不是影响云团外形尺寸的主要因素,但长径比较大的装置有利于燃料的径向抛撒,云团融合更均匀。综合考察,长径比 3～5 较好,可依据弹药总体设计要求在此范围确定。

(3) 不同材质壳体的对比实验表明,钢质壳体综合性能优于铝质壳体,云雾抛撒状态较好;从实际毁伤效果看,钢弹亦优于铝弹。

References:

[1] 郭学永,惠君明.长径比对 FAE 云团状态的影响研究 [J].火炸药学报,2002,25(4):8－10.
[2] Zabelka R J,Smith L H. Explosively Dispersed Liquids [R]. AD 863268,1969.
[3] Lavoie L. Fuel-Air Explosive [J]. Weapons and Effects,Military Technology,1989(9):64－70.
[4] Gardner D R. A Coupled Near-Field Far-Field Dispersal Model for Fuel-Air-Explosive [R]. SAND 90-0687. 1990.
[5] 丁 珏.液体的爆炸抛撒理论模型及全过程数值模拟 [D].南京:南京理工大学,2001. 21－29.
[6] 惠君明.FAE 燃料抛撒与云雾状态的控制 [J].火炸药学报,1999,22(1):10－13.
[7] 爆炸及其作用编写组.爆炸及其作用 [M].北京:国防工业出版社,1979. 38－40.

Experimental Study on the Influence of Device Parameters of FAE to Fuel Dispersion and Explosive Power

HUI Jun-Ming,ZHANG Tao,GUO Xue-Yong

(*School of Chemical Engineering*,*NUST*,*Nanjing* 210094,*China*)

Abstract:According to observation results of explosive dispersion process of FAE(fuel-air explosive) test device with fast kinematics analysis system,the different dispersion stages of fuel were characterized and the influence of specific central explosive,ratio of height to diameter and shell material to fuel dispersion was studied in this paper. The results show that dispersion process can be divided into the following three phases,jet formation and expansion movement phase,two-direction expansion movement phase and gas-liquid amalgamation movement phase. The different stages of fuel dispersion process correspond with different hydrodynamics characteristics and contribute to the formation of cloud in respective. Under the conditions of general optimization of test device, cloud area and volume were expanded by properly increasing specific central explosive. The ratio of height to diameter was not a remarkable factor influencing cloud status,but larger ratio of height to diameter dispersed fuel better. Cloud dispersion of steel shell was better than that of aluminum shell. It is concluded that ideal detonation status of cloud and high power effect can be attained when the steel shell,specific central explosive about 3% and ratio of height to diameter between 3 and 5 are adopted and are well-matched of three device parameters above.

Key words:fuel-air explosive;device parameters;explosive dispersion;ratio of height to diameter

第 12 届全国高压学术讨论会最后一轮通知

经中国物理学会高压物理专业委员会决定,第 12 届全国高压学术讨论会将于 2004 年 9 月 12 日～19 日在安徽黄山市召开,会期约一周。此次会议由中国工程物理研究院流体物理研究所承办,现将参加会议的有关事宜通知如下:

(1) 报到时间:2004 年 9 月 12 日;接站服务:9 月 12 日(8:00～23:00)在黄山市机场设有专人接站

(2) 报到地点:黄山市黄山区平湖路 17 号黄山京华酒店(原黄山太平国际大酒店),酒店电话:0559-8513999、0559-8513959

(3) 开会时间:2004 年 9 月 13 日～2004 年 9 月 19 日

(4) 会议费用:1000 元/人(学生 800 元/人,以学生证为凭)

(5) 论文宣读:PowerPoint,如用其它交流方式,请说明

会议内容包括:(1) 高压加载和测试技术,(2) 高压下材料的物理和力学性质,(3) 物态方程和相变,(4) 人工合成新材料(包括纳米材料),(5) 高压地学,(6) 冲击和爆轰现象,(7) 流体动力学现象,(8) 断裂。

投稿联系人:周菁菁,E-mail:gaoya@caep.ac.cn, 电话:0816-2490042,13890154662

会务联系人:王晓梅,E-mail:LSD_A@21CN.com, 电话:0816-2485105,13778133453